BULLETIN DE L'OBSERVATOIRE DE LYON
TOME X N° 2 FÉVRIER 1928.

La diffusion et la filtration du rayonnement solaire par l'atmosphère.

Le Soleil est la source initiale de la vie et du mouvement à la surface de la Terre. Toutes les réserves d'énergie du monde, les gisements de houille, les cours d'eau, les vents, les êtres vivants eux-mêmes sont les témoins de son activité incessante dans le présent ou le passé. L'omnipotence du Soleil s'est imposée de tout temps à l'esprit humain. Considéré autrefois comme une divinité bienfaisante, il est resté « le creuset géant où bout l'âme des mondes », le gigantesque laboratoire où s'accomplissent sans arrêt, à une formidable échelle, les transformations les plus curieuses et les plus variées.

Mais ce merveilleux laboratoire est extrêmement éloigné. Nous en sommes séparés par 150 millions de kilomètres. En dépit de ce fossé fantastique, nous connaissons actuellement la composition chimique de l'astre, les singularités et les modifications de sa surface. Nous avons pu reconnaître et analyser les couches successives de l'atmosphère solaire et y faire de véritables mesures de température, de pression, de champ magnétique. Nous essayons même de deviner les causes premières de l'énorme énergie rayonnée et d'expliquer sa permanence extraordinaire.

Quelle est la sonde enchantée qui nous a permis d'effectuer ces analyses et ces mesures ? A quel messager subtil et complaisant devons-nous ces révélations ? Sous quelle forme s'exerce l'action du Soleil sur notre planète et sur tous les êtres qu'elle porte ?

Si l'on considère à part la liaison mystérieuse de la gravitation, et si l'on excepte les jets de particules électrisées qui viennent troubler les couches supérieures de notre atmosphère en y produisant les aurores boréales, le lien unique entre le Soleil et l'observateur terrestre est établi par la lumière. Il en est ainsi pour tous les astres. Leur existence, leur forme, leurs déplacements relatifs ne nous sont révélés que par les radiations qu'ils émettent ou réfléchissent. Mais la lumière porte encore en elle-même d'autres renseignements précieux. Le rayonnement d'une source quelconque, terrestre ou céleste, est en réalité un ensemble complexe, pouvant être résolu en une infinité d'éléments indécomposables appelés radiations simples ou monochromatiques, dont l'ensemble cons-

titue le spectre de la source considérée. Lorsqu'une telle analyse est réalisée, au moyen du prisme, du réseau ou de l'appareil interférentiel, on peut en déduire des indications précises sur la composition chimique du corps, son état physique, son mouvement radial, sur le champ magnétique ou électrique qui l'environne.

Avant d'aborder la description du spectre solaire, il est utile de rappeler brièvement les caractères physiques qu'il suffit d'attribuer à la lumière pour interpréter simplement et dans leur ensemble les phénomènes optiques. Chaque radiation simple doit être considérée comme une perturbation périodique, mouvement vibratoire analogue au son ou onde électromagnétique, se propageant dans le vide ou la matière transparente avec une vitesse uniforme. De plus, un faisceau lumineux effectue un transport d'énergie entre le corps qui l'émet et celui qui le reçoit. Il suffit, pour mesurer cette énergie, de provoquer sa transformation en chaleur en absorbant le rayonnement par un récepteur approprié, thermomètre à surface noircie ou appareil analogue. Nous connaissons le rôle capital joué par ce transport incessant d'énergie du Soleil à la Terre.

Toutes les radiations simples se propagent dans le vide avec la même vitesse, égale à 300.000 kilomètres par seconde. Mais chacune d'elles est caractérisée par sa période, c'est-à-dire par la durée d'une vibration complète, la perturbation ayant passé successivement par toutes ses phases. Cette période est beaucoup trop courte pour se prêter aux mesures directes. On lui substitue, pour définir numériquement chaque radiation, la période dans l'espace ou longueur d'onde, égale au produit de la vitesse par la période proprement dite. Nous retrouvons d'ailleurs ces mêmes éléments fondamentaux dans tous les phénomènes qui font intervenir à la fois la périodicité et la propagation. Si nous marchons, par exemple, d'un mouvement uniforme en faisant des pas égaux, notre corps se retrouve exactement dans la même position chaque fois que nous avons achevé un double pas. La durée du double pas est donc la période ; sa longueur, qui est le produit de la vitesse de propagation par cette durée, représente la longueur d'onde. Dans le cas de la lumière, la vitesse est énorme, mais la période est si courte que la longueur d'onde est elle-même extrêmement petite. Pour nous rapprocher de ces conditions, il faudrait imaginer un petit animal, un être fantastique faisant des pas de quelques dix-millièmes de millimètre et parcourant cependant en une seconde à peu près la distance de la Terre à la Lune. Les lon-

gueurs d'onde lumineuses sont généralement exprimées au moyen d'une unité particulière, l'angström, qui équivaut à 1/10.000 de micron, le micron étant lui-même le millième de millimètre. Les dimensions moléculaires et atomiques, que l'on sait actuellement mesurer, sont justement de l'ordre de l'angström.

Les premières radiations étudiées ont été celles qui impressionnent notre œil. Leur longueur d'onde, variable avec la couleur, est comprise entre 4000 A. pour le violet extême et 8000 A. pour le rouge le plus sombre. Mais on a reconnu que cette limitation est d'ordre purement physiologique et que le domaine des radiations s'étend largement de part et d'autre du spectre visible, qui n'en constitue en réalité qu'une très petite partie. En substituant à la rétine devenue insensible d'autres récepteurs, comme la plaque photographique, on a pu déceler et étudier les radiations ultraviolettes, de longueur d'onde inférieure à 4.000 A. et en reculer progressivement la limite jusqu'à 100 A. environ. A partir de l'autre extrémité, du spectre visible, les radiations infrarouges, dont la longueur d'onde dépasse 8000 A., ont été découvertes et examinées principalement au moyen du récepteur calorifique sous ses différentes formes : thermomètre noirci, pile thermo-électrique ou bolomètre. Un tel récepteur est universel, c'est-à-dire sensible à toute radiation, quelle que soit sa longueur d'onde. C'est uniquement pour des raisons de sensibilité et de commodité qu'on lui préfère, dans d'autres régions spectrales, l'œil ou la plaque photographique.

On sait maintenant que les rayons infrarouges de grande longueur d'onde ne diffèrent pas des ondes hertziennes les plus courtes. On a réussi également à établir la liaison entre les rayons ultraviolets et les rayons X. Depuis ces derniers jusqu'aux ondes les plus longues de la télégraphie sans fil, l'immense domaine des radiations a été exploré et ne présente aucune lacune.

Nous pouvons à présent considérer le rayonnement du Soleil disséqué par l'appareil dispersif à prisme ou à réseau. Le spectre solaire, tel qu'on peut l'observer à la surface de la Terre, est compris dans un intervalle de longueurs d'onde plus étendu que le champ très réduit des radiations perceptibles par l'œil. Dans la région ultraviolette contiguë au spectre visible, le rayonnement conserve tout d'abord une intensité relative considérable. Mais on constate bientôt, à partir de 3000 A., un affaiblissement si rapide qu'aucune radiation ne peut être enregistrée au-dessous de 2900 A. Au voisinage de l'extrémité, il suffit d'un très léger

déplacement, égal à 5 A., vers les courtes longueurs d'onde, pour voir l'intensité tomber à la moitié de sa valeur. A première vue, une disparition aussi précipitée se présente comme une coupure brusque, et c'est pourquoi on cherchait autrefois à déterminer la limite ultraviolette du spectre solaire, correspondant à la dernière radiation observable.

C'est dans l'infrarouge que le spectre solaire possède la plus grande étendue. On observe en effet, vers les grandes longueurs d'onde, une diminution d'intensité beaucoup moins rapide que dans l'ultraviolet. Si l'on fait abstraction de certaines irrégularités, on peut dire que le rayonnement s'affaiblit lentement et progressivement, sans limitation nette dans l'échelle des longueurs d'onde. Toutefois, au-delà de 5 microns (50.000 A.), l'intensité énergétique des radiations qui subsistent est extrêmement faible.

Le bolomètre, forme perfectionnée et très sensible du récepteur calorifique, a permis de mesurer l'énergie relative transportée par les radiations solaires possédant une longueur d'onde déterminée .L'ensemble des mesures fournit la répartition de l'énergie dans le spectre solaire, qu'il est commode de traduire par une courbe représentant les variations de l'intensité relative en fonction de la longueur d'onde. Cette courbe est dissymétrique ; elle présente une chute abrupte dans l'ultraviolet et s'abaisse au contraire lentement vers les grandes longueurs d'onde. L'ordonnée maximum, proportionnelle à la plus grande énergie relative, se place dans le spectre visible, au voisinage de la longueur d'onde pour laquelle l'œil possède la plus grande sensibilité.

Jusqu'à présent, nous avons schématisé à dessein les résultats des observations. Dès qu'on a su obtenir un spectre pur, où les radiations sont convenablement séparées, on s'est aperçu en effet que le spectre solaire est strié d'un nombre considérable de raies sombres, de largeur et d'aspect variables, non absolument noires, mais seulement moins brillantes que les intervalles qui les séparent. On les appelle raies de Fraunhofer, du nom de l'opticien qui fut le premier à reconnaître qu'elles conservent une position fixe par rapport aux couleurs du spectre. Ainsi, la courbe d'énergie du spectre solaire, dont nous venons d'indiquer la forme générale, présente en réalité une multitude de dentelures, de fossés très étroits et plus ou moins profonds, correspondant à ces nombreuses raies, dont le nombre se chiffre par dizaines de milliers. Le spectre solaire n'est pas continu, comme celui du filament incandescent d'une lampe électrique ; c'est au contraire un spectre dans lequel l'intensité varie d'une manière extrêmement irrégulière et compliquée.

Cette structure singulière a été expliquée vers 1860 par Kirchhoff, le fondateur de l'analyse spectrale. Le spectre solaire n'est autre qu'un spectre d'absorption, analogue à celui que l'on observe en intercalant entre la lampe à incandescence et la fente du spectroscope une substance transparente colorée. Le spectre continu du filament est alors modifié ; la disparition de certaines radiations, absorbées par la substance, se traduit par des bandes ou raies sombres plus ou moins nombreuses. Dans le cas du Soleil, on admet que le noyau de l'astre émet un spectre continu, mais un très grand nombre de radiations sont partiellement absorbées par les couches successives de l'atmosphère solaire. Comme dans l'expérience classique du renversement de la raie du sodium, les vapeurs qui constituent cette atmosphère absorbent les radiations caractéristiques des éléments qu'elles renferment. En fait, il existe une concordance quasi absolue entre les longueurs d'onde des raies de Fraunhofer et celles qui ont été mesurées au laboratoire dans les spectres de ces éléments. Les phénomènes sont sans doute moins simples que ne le prévoyait Kirchhoff, mais l'explication précédente renferme certainement une grande part de vérité.

Avant d'atteindre le spectroscope, les rayons ne traversent pas seulement les vapeurs de la chromosphère solaire, mais encore l'enveloppe gazeuse de notre planète. Aussi, le spectre que nous obtenons n'est pas le spectre réel du Soleil, tel qu'on l'observerait d'une station située en dehors de l'atmosphère terrestre. Celle-ci produit en effet d'importantes modifications qu'il est possible de mettre en évidence et d'étudier en faisant varier systématiquement l'épaisseur d'air traversée par la lumière. Pour obtenir ce résultat, il suffit d'expérimenter à des altitudes accessibles diverses ou de confier les instruments aux ballons-sondes, qui peuvent s'élever à plus de 20 kilomètres. Mais il est plus commode de ne pas changer de station d'observation et d'examiner la transformation progressive du spectre, à mesure que le Soleil s'abaisse sur l'horizon. En effet, la longueur du trajet de la lumière à travers l'atmosphère augmente de plus en plus, par suite de l'obliquité croissante des rayons. Dans tous les cas, on calcule aisément l'épaisseur d'air traversée (réduite, par exemple, aux conditions normales de pression et de température), soit à partir de la pression barométrique, soit en tenant compte de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon.

On détermine ainsi quantitativement l'absorption atmosphérique qui représente, pour chaque radiation simple, la diminution d'énergie subie par le rayonnement solaire. Lorsqu'elle est connue, il est possible de

reconstituer le véritable spectre solaire, c'est-à-dire de calculer, pour chaque longueur d'onde, l'intensité qui serait mesurée directement en dehors de notre atmosphère. Enfin, pour contrôler ou compléter les résultats obtenus, il est utile d'examiner le spectre d'une source terrestre à travers une épaisseur d'air plus ou moins grande, et surtout d'étudier au laboratoire les propriétés absorbantes des constituants de l'atmosphère.

L'application de cette méthode très simple est en réalité fort délicate. La superposition de phénomènes différents complique singulièrement l'interprétation des résultats bruts de l'expérience. Mais le problème de l'absorption atmosphérique présente une importance considérable qui devait servir de stimulant à l'activité des physiciens et des astronomes. Il fait intervenir la planète qui nous porte et l'astre dont nous dépendons étroitement. Il intéresse à la fois la physique solaire et la météorologie terrestre. Nous allons examiner dans quelle mesure, à l'heure actuelle, il peut être considéré comme résolu.

Sans nous préoccuper de l'ordre historique, nous étudierons en premier lieu une cause générale d'affaiblissement qui agit indifféremment sur toutes les radiations, quelle que soit leur longueur d'onde. Cette cause se rattache aux propriétés optiques des milieux troubles ; elle rend exactement compte de l'éclat du ciel et de sa couleur bleue, pour laquelle tant d'explications erronées avaient été proposées autrefois.

Un milieu trouble est constitué par une matière transparente homogène renfermant un nombre immense de particules en suspension, trop petites pour être distinguées individuellement. Lorsqu'on éclaire un tel milieu par un faisceau de lumière, l'énergie rayonnante est dispersée de tous les côtés, éparpillée dans toutes les directions. Les particules frappées par le rayonnement se comportent comme de véritables sources secondaires, émettant à leur tour de la lumière. L'intensité du faisceau incident est donc réduite dans une certaine proportion ; il se produit une absorption apparente correspondant à l'énergie rejetée latéralement. Le phénomène porte le nom de diffusion.

Les propriétés de la lumière diffusée, et en particulier sa composition spectrale, dépendent de la grosseur des particules. Si l'on éclaire la substance avec de la lumière blanche, analogue à celle du Soleil, et si les dimensions des particules sont petites par rapport aux longueurs d'onde, la lumière diffusée est bleue. Cette couleur révèle une modification profonde de la répartition spectrale des intensités ; elle indique une prédominance des radiations voisines de l'extrémité violette du spec-

tre visible. Ainsi, dans ce cas, la diffusion affecte de préférence les ondes lumineuses les plus courtes. La théorie du phénomène, faite dès 1871 par le grand physicien anglais Lord Rayleigh, montre que l'intensité diffusée doit varier en raison inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde.

La lumière du Soleil est certainement diffusée par l'atmosphère. On retrouve en effet toutes les raies de Fraunhofer dans le spectre du ciel. En outre, par temps clair, le ciel paraît bleu, comme les brouillards et les nuages artificiels réalisés au laboratoire. Ces analogies avaient été remarquées depuis longtemps, mais il restait à découvrir la nature des centres diffusants existant dans une atmosphère absolument pure, c'est-à-dire privée de particules solides ou liquides. En 1899, Lord Rayleigh, par une généralisation audacieuse, admit que ce sont les molécules des gaz permanents de l'air, disséminées dans le vide, qui diffusent la lumière. Les poussières et les gouttelettes qui existent en quantité variable dans la basse atmosphère interviennent seulement pour modifier plus ou moins ce phénomène essentiel. Pour éliminer l'influence de cette sorte de vase, il suffit d'ailleurs d'expérimenter à une altitude suffisante, de manière à reconnaître uniquement l'action constante des gaz de l'air.

Les importantes observations de deux astronomes américains, Abbot et Fowle, relatives à l'absorption atmosphérique, ont abouti à la vérification complète de l'hypothèse de Lord Rayleigh. Les résultats les plus nets ont été obtenus par Fowle, en 1910 et 1911, au mont Wilson, à 1.780 mètres d'altitude. La loi fondamentale de diffusion, d'après laquelle le coefficient d'absorption apparente est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la longueur d'onde, est parfaitement vérifiée dans une large étendue spectrale. De plus, l'application des formules théoriques établies par Lord Rayleigh permet de déduire des mesures le nombre de centres diffusants, c'est-à-dire de molécules, par unité de volume, dans les conditions normales de température et de pression. Ce nombre, qui ne dépend pas de la nature du gaz, est une constante fondamentale de l'atomistique. On sait à l'heure actuelle le déterminer par une quinzaine de méthodes indépendantes fournissant cependant des résultats concordants. Celle qui est basée sur l'étude de l'absorption atmosphérique et du bleu du ciel ne fait pas exception ; elle nous apporte au contraire une nouvelle preuve de la réalité moléculaire.

Il restait encore à reproduire les phénomènes au laboratoire et à montrer qu'une masse d'air pur, constituée uniquement par des molé-

cules et parfaitement exempte de poussières, n'est pas « optiquement vide », mais diffuse la lumière dans toutes les directions. Cette preuve décisive a été donnée en 1915 par un de nos collègues de l'Université de Montpellier, M. Cabannes, qui a en outre perfectionné la théorie de Lord Rayleigh. Les mesures de contrôle exécutées au laboratoire par M. Cabannes et ses collaborateurs sont en harmonie parfaite avec les observations de Fowle. Ainsi, la couleur bleue du ciel, si souvent chantée par les poètes, est bien celle d'un milieu trouble. Les géniales conceptions de Lord Rayleigh ont reçu de l'expérience leur consécration définitive.

Il semble bien qu'on puisse attribuer uniquement à la diffusion moléculaire l'affaiblissement du rayonnement solaire dans le bleu, le violet et le début de l'ultraviolet. Mais cette conclusion n'est plus valable pour les autres régions du spectre. A l'absorption apparente, caractérisée par une réémission et une simple dispersion de l'énergie reçue, se superpose en effet une absorption vraie, accompagnée d'effets calorifiques ou chimiques et comportant, par conséquent, une véritable transformation de l'énergie rayonnante.

Cette seconde cause d'affaiblissement a été reconnue bien avant que la première n'ait été correctement expliquée. On sait en effet depuis près d'un siècle que toutes les raies noires du spectre solaire n'ont pas l'origine qui a été indiquée; quelques-unes, appelées raies telluriques, prennent naissance dans l'atmosphère terrestre. Elles sont d'autant moins visibles que l'observateur est à une altitude plus élevée et que le Soleil est plus près du zénith. Elles apparaissent ou s'élargissent progressivement à mesure que l'épaisseur d'air traversée par la lumière augmente, et ceci constitue l'un des caractères qui permettent de les distinguer des raies d'origine solaire.

De nombreuses raies ou bandes telluriques ont été découvertes dans la partie la moins réfrangible du spectre solaire, entre l'extrémité infrarouge et 5000 A. Elles doivent être attribuées à l'oxygène, à la vapeur d'eau et au gaz carbonique. Leur origine terrestre a été confirmée au moyen d'expériences directes sur ces gaz qui, sous une épaisseur suffisante, absorbent effectivement les radiations dont on constate l'affaiblissement dans le spectre solaire. Les raies telluriques dues à la vapeur d'eau augmentent d'intensité avec l'état hygrométrique de l'atmosphère; au contraire, elles s'atténuent considérablement lorsque l'air est très sec. On a pensé à un moment donné qu'il serait possible de prévoir la

pluie et les orages en observant les variations d'intensité de la « bande de la pluie », constituée par un grand nombre de raies situées dans l'orangé, au voisinage de la raie D de Fraunhofer. Mais cet espoir a été déçu, car les précipitations atmosphériques ne dépendent pas uniquement de la quantité totale de vapeur d'eau traversée par les rayons solaires.

Dans la partie du spectre correspondant au vert, au jaune et à l'orangé, les observations montrent que l'absorption atmosphérique est sensiblement plus grande que si la diffusion moléculaire intervenait seule. Ce résultat est indépendant de l'existence des raies telluriques signalées précédemment ; il subsiste quand on élimine l'effet de la vapeur d'eau. L'atmosphère renferme donc un autre gaz exerçant sur le rayonnement solaire, entre 4800 et 6400 A., une absorption sélective s'ajoutant à la diffusion. Cette dernière cause d'affaiblissement, qui varie lentement et régulièrement avec la longueur d'onde, ne permet pas non plus d'expliquer la limitation brusque du spectre solaire dans l'ultraviolet, au voisinage de 2900 A.

Ainsi, la connaissance de ces particularités soulève encore deux problèmes en apparence distincts. Ils ont été résolus récemment grâce aux efforts de MM. Fabry et Buisson et de leurs élèves. Nous venons de les rapprocher parce qu'ils comportent la même solution. Les anomalies de la transparence de l'atmosphère dans une partie du spectre visible ont en effet la même origine que l'évanouissement rapide du rayonnement solaire dans l'ultraviolet. On doit les attribuer à la présence permanente d'une certaine quantité d'ozone, localisée en grande partie dans la haute atmosphère.

L'étendue restreinte du spectre solaire ultraviolet, comparé à celui de certaines sources terrestres, comme l'étincelle électrique, a attiré depuis longtemps l'attention des physiciens. La limite du spectre ne varie pas sensiblement avec l'altitude, mais elle rétrograde vers les grandes longueurs d'onde lorsque le Soleil s'abaisse sur l'horizon. D'autre part, les spectres des étoiles sont tous limités de la même manière dans l'ultraviolet. Il était donc difficile de nier le rôle joué par l'atmosphère terrestre et d'admettre que le Soleil n'émet aucune radiation de longueur d'onde inférieure à 2900 A. Ce dernier point de vue est d'ailleurs insoutenable depuis que l'on a reconnu, dans toute l'étendue spectrale accessible, les caractères essentiels de l'émission solaire. Nous savons en effet qu'il est possible, après avoir mesuré l'absorption atmosphérique pour chaque radiation, de remonter à l'intensité réelle dans le spectre avant la traversée

de l'atmosphère. On trouve ainsi que le rayonnement du Soleil se rapproche beaucoup de celui d'un corps parfaitement absorbant pour toutes les radiations, d'un corps noir, au sens des physiciens, à la température de 6000° environ. L'émission d'un tel corps est parfaitement connue ; elle n'est pas interrompue brusquement dans l'ultraviolet vers 3000 A. L'énergie transportée par les radiations de longueur d'onde inférieure à cette limite est loin d'être négligeable ; elle représente la 1/24e partie de l'énergie totale. Il est d'ailleurs fort heureux que le rayonnement qui nous parvient soit privé de ces radiations, dont on connaît l'action nocive sur les cellules vivantes. En définitive, il existe dans l'atmosphère un gaz qui doit les absorber et dont la présence permanente est une condition essentielle de la vie à la surface du globe.

Parmi les constituants connus de l'air, l'ozone paraissait seul capable de jouer un tel rôle. Ce gaz est une modification allotropique, une forme condensée de l'élément oxygène, que l'on obtient spontanément en soumettant l'oxygène ordinaire à l'action des rayons ultraviolets de longueur d'onde inférieure à 2000 A. Les radiations absorbées par l'ozone, à l'état gazeux, sont actuellement bien connues. Dans la région ultraviolette, celles qui subissent la plus forte diminution d'intensité forment une large bande s'étendant de 2000 à 3000 A. environ. L'un des bords de cette bande coïncide bien avec la limite du spectre solaire. L'ozone est le seul gaz atmosphérique présentant cette particularité et dont la présence puisse expliquer les faits observés. Toutefois, cette explication ne pouvait être pleinement justifiée qu'au moyen des données numériques résultant d'une étude quantitative des phénomènes.

MM. Fabry et Buisson ont tout d'abord déterminé avec précision le coefficient d'absorption de l'ozone, représentant la fraction d'énergie non transmise, dans la grande bande comprise entre 2000 et 3000 A. Ils ont ensuite montré que les coefficients d'absorption de l'atmosphère et de l'ozone sont proportionnels dans la région spectrale accessible aux mesures de comparaison. Le rapport de ces coefficients, indépendant de la longueur d'onde, mesure l'épaisseur d'ozone qui serait traversée par des rayons verticaux. La présence dans l'atmosphère d'une couche d'ozone pur, ayant une épaisseur voisine de 3 millimètres (réduite aux conditions normales de température et de pression), suffit pour expliquer la limitation du spectre solaire vers 2900 A. et la très rapide diminution d'intensité au voisinage immédiat de cette limite. Tel est le résultat fondamental obtenu en 1921 par MM. Fabry et Buisson.

Dans la région comprise entre 3100 et 3450 A., au-delà de la grande bande déjà signalée, l'absorption par l'ozone n'est pas absolument nulle ; elle est seulement beaucoup plus faible et varie d'une manière irrégulière et compliquée. Ses variations se manifestent par de nombreuses bandes relativement étroites, dont la position et la structure ont fait l'objet de travaux récents. Si nous admettons l'existence permanente de l'ozone dans l'atmosphère, nous devons évidemment retrouver ces bandes dans le spectre de tous les astres. Elles ont été effectivement reconnues dans les spectres des étoiles, puis dans le spectre solaire lui-même. Dans ce dernier cas, l'identification des bandes de l'ozone présentait certaines difficultés dues à la présence de nombreuses raies de Fraunhofer dans la région considérée. Les absorptions par l'atmosphère solaire et par l'atmosphère terrestre se superposent ici d'une manière extrêmement compliquée. Une technique appropriée permet cependant de résoudre ces difficultés et j'ai pu récemment, en collaboration avec MM. Lambert et Chalonge, retrouver dans le spectre solaire tous les détails connus du spectre d'absorption de l'ozone. Les courbes représentant, en fonction de la longueur d'onde, les variations de l'absorption atmosphérique, présentent exactement les mêmes sinuosités que la courbe d'absorption de l'ozone, déduite d'expériences directes sur ce gaz. Nous avons même réussi à distinguer, dans le spectre solaire, quelques bandes nouvelles, qui ont été retrouvées depuis dans le spectre de l'ozone, étudié au laboratoire par MM. Chalonge et Lambrey. Les résultats du beau travail de MM. Fabry et Buisson se trouvent ainsi confirmés d'une manière particulièrement convaincante.

La quantité totale d'ozone contenue dans l'atmosphère suffit pour expliquer la disparition complète du spectre entre 2100 et 2900 A., dans la grande bande d'absorption ultraviolette. Mais elle n'explique pas l'absence de radiations de longueurs d'onde inférieures à 2100 A., pour lesquelles l'absorption de l'ozone redevient très faible. MM. Duclaux et Jeantet ont montré que la quantité de gaz ammoniac contenue normalement dans l'air pourrait absorber ces radiations, mais seulement à partir de 2020 A. Même en tenant compte de la présence simultanée de l'ozone et du gaz ammoniac, le spectre solaire devrait réapparaître dans une bande étroite au voisinage de 2100 A., correspondant à un intervalle de transparence atmosphérique. On peut espérer, de plus, observer à une haute altitude un élargissement de cet intervalle vers les courtes longueurs d'onde, le gaz ammoniac étant vraisemblablement, au con-

traire de l'ozone, beaucoup plus abondant dans les régions basses de l'atmosphère.

J'ai tenté, il y a quelques années, en collaboration avec MM. Chalonge et Lambert, de mettre en évidence cette réapparition du spectre solaire dans l'ultraviolet lointain. Nos observations ont été faites, dans des conditions particulièrement favorables, à l'Observatoire du mont Blanc, dont l'altitude est voisine de 4350 mètres et où la pression barométrique est réduite à 45 centimètres. Elles ont donné un résultat absolument négatif. Entre 1850 et 2100 A., aucune radiation ne peut être décelée dans le rayonnement solaire qui parvient à cette altitude.

Le Soleil doit cependant émettre en proportion appréciable des radiations de longueur d'onde inférieure à 2100 A., mais elles sont absorbées par l'un des constituants de l'atmosphère et vraisemblablement par l'oxygène. En effet, le spectre d'absorption de l'oxygène comprend, entre 1850 et 2000 A, plusieurs systèmes de bandes qui apparaissent pour une épaisseur d'oxygène traversée de l'ordre du mètre. Lorsque cette épaisseur est, comme dans l'atmosphère, de l'ordre du kilomètre, il est probable qu'elles s'élargissent suffisamment pour rejoindre la grande bande de l'ozone et absorber toutes les radiations solaires au-dessous de 2100 A. Pour justifier cette explication, il serait intéressant d'étudier plus complètement le spectre d'absorption de l'oxygène et peut-être aussi de reprendre notre expérience à très haute altitude, au moyen d'un ballon-sonde muni d'un spectrographe convenable.

Les dosages optiques de MM. Fabry et Buisson donnent la quantité totale d'ozone, mais ne fournissent aucune indication sur la région de l'atmosphère où se trouve le gaz absorbant. On peut supposer en premier lieu que l'ozone est réparti uniformément dans l'air et calculer sa proportion en volume ; on trouve ainsi 0,4 centimètre cube par mètre cube. Cette proportion n'est certainement pas atteinte dans les régions accessibles de l'atmosphère ; elle suffirait pour rendre l'air difficilement respirable. En effet, les dosages chimiques de l'ozone dans l'air, effectués à des altitudes accessibles variées, indiquent une proportion variant de 0,01 à 0,04 centimètre cube par mètre cube, c'est-à-dire en moyenne 20 fois plus faible que la précédente. Ce résultat a été vérifié d'une manière frappante en étudiant l'absorption des couches d'air inférieures sur le rayonnement ultraviolet d'une source artificielle. La radiation de longueur d'onde 2537 A., émise par une lampe à vapeur de mercure, est encore transmise d'une manière appréciable sur une longueur de

6 kilomètres, mesurée au niveau du sol. Elle serait absolument inobservable si l'ozone était réparti uniformément dans l'air. Il faut donc renoncer à cette hypothèse et admettre au contraire qu'il existe dans la haute atmosphère une région où se trouve concentrée la plus grande partie de l'ozone.

D'autres preuves ont été apportées à l'appui de cette conclusion. L'une est basée sur les mesures, à diverses altitudes, de la constante solaire, qui représente l'énergie totale reçue du Soleil, par centimètre carré et par minute. Une autre utilise les caractères du spectre des différentes régions du ciel au crépuscule. Enfin, dans une nouvelle série d'expériences à l'Observatoire du mont Blanc, nous avons montré directement que lorsque le Soleil s'abaisse sur l'horizon, l'accroissement de l'épaisseur d'ozone traversée par la lumière n'est pas proportionnel à l'accroissement de la masse d'air. Or, cette proportionnalité résulterait nécessairement d'une distribution uniforme. Ainsi, tous les faits observés sont d'accord avec l'hypothèse de l'existence d'une couche absorbante élevée, dans une région où l'air est extrêmement raréfié. Le rayonnement solaire est d'abord filtré par l'ozone, puis diffusé, suivant le mécanisme prévu par Lord Rayleigh, par les couches de plus en plus denses de l'atmosphère inférieure.

La localisation de l'ozone à haute altitude s'explique d'ailleurs d'une manière très satisfaisante. On sait, en effet, que l'oxygène est transformé en ozone par les radiations de très courtes longueurs d'onde, inférieures à 2000 A. De telles radiations doivent exister dans le rayonnement solaire qui, nous l'avons supposé, diffère peu de celui du corps noir à 6000°. Ce sont elles qui ozonisent l'atmosphère, mais l'énergie qu'elles transportent est utilisée dans cette transformation. Absorbées fortement par l'oxygène, elles ne peuvent pénétrer profondément et n'agissent que sur les premières couches. Par contre, les radiations de la région comprise entre 2200 et 3000 A. décomposent l'ozone. Il s'établit un état d'équilibre entre ces actions opposées et la quantité d'ozone qui subsiste dépend des intensités relatives des radiations antagonistes.

Il était intéressant de déterminer, au moins approximativement, l'altitude de la couche d'ozone. C'est ce problème, posé par MM. Fabry et Buisson, que j'ai essayé de résoudre, en collaboration avec MM. Chalonge et Lambert. Pour y parvenir, il fallait suivre jusqu'au coucher du Soleil les modifications de son spectre ultraviolet. En effet, c'est seulement lorsque la hauteur de l'astre est suffisamment faible que la lon-

gueur du trajet de la lumière à travers la couche d'ozone dépend de l'altitude de celle-ci. L'influence de la courbure terrestre, qui fait intervenir l'altitude, ne se manifeste d'une manière appréciable que dans ces conditions.

L'observation du Soleil au voisinage de l'horizon n'est possible qu'en haute montagne, sous un ciel parfaitement pur. Nos spectrogrammes, obtenus à l'Observatoire du mont Blanc, présentent à cet égard toutes les garanties désirables. Mais la méthode elle-même, basée sur l'observation directe du Soleil, comporte certaines difficultés d'application qui limitent nécessairement sa précision. Nous n'avons donc pu déduire de nos résultats qu'une évaluation assez grossière de l'altitude cherchée. Nous pouvons seulement affirmer qu'elle est voisine de 45 kilomètres, avec une erreur possible d'une dizaine de kilomètres.

D'ailleurs, la valeur de l'altitude, calculée à partir des observations, doit être envisagée avec certaines réserves. L'épaisseur de la région occupée par l'ozone n'est certainement pas négligeable ; elle est en outre mal définie. Le gaz absorbant ne reste pas confiné dans les hautes régions où il se forme sous l'action des radiations solaires de très courte longueur d'onde. Il doit pénétrer peu à peu dans la moyenne atmosphère et il existe d'ailleurs, en très petite quantité, mais d'une manière constante, dans les couches les plus basses. Certaines observations récentes semblent même indiquer l'existence de deux régions de concentration maximum, à des altitudes différentes.

MM. Cabannes et Dufay, nous précédant dans la même voie, ont déterminé l'altitude de la couche d'ozone en cherchant à éviter les inconvénients de la méthode d'observation directe du Soleil. Nous avons vu que la plus grande partie de l'ozone se trouve vraisemblablement au-dessus des couches diffusantes de l'atmosphère. Les deux causes d'affaiblissement du rayonnement solaire n'interviennent pas simultanément : la filtration par l'ozone, qui précède la diffusion, doit donc rester la même, quelle que soit la région du ciel vers laquelle on dirige le spectrographe. MM. Cabannes et Dufay partent de ce fait, supposé bien établi, pour substituer à la photographie directe du spectre solaire l'étude beaucoup plus facile du ciel au zénith, fonctionnant uniquement comme un « diffuseur commode ». En expérimentant dans ces conditions, ils ont trouvé que l'altitude de la couche d'ozone est comprise entre 45 et 50 kilomètres. Il existe donc un accord satisfaisant entre les résultats fournis par les deux méthodes d'observation.

Dans le spectre visible, entre 4500 et 6500 A., l'ozone présente une région d'absorption continue se manifestant au spectroscope par une nouvelle série de bandes plus ou moins sombres. L'étude complète de ces bandes a été faite récemment au laboratoire de M. Fabry, mais elles n'ont pas été reconnues directement dans le spectre solaire comme celles de la région ultraviolette. Elles sont en effet beaucoup plus faibles et n'apparaissent qu'avec de fortes épaisseurs d'ozone. En particulier, elles ne peuvent modifier sensiblement la teinte de la lumière solaire et intervenir, comme on l'a cru autrefois, dans la production de la couleur bleue du ciel.

Cependant, les mesures précises d'absorption atmosphérique devaient permettre de mettre ces bandes en évidence. La quantité totale d'ozone contenue dans l'air est assez grande pour produire dans le vert, le jaune et l'orangé, une diminution appréciable de la transparence de l'atmosphère, s'ajoutant à l'effet de la diffusion. Nous avons vu que cette prévision est en accord avec les faits observés. MM. Cabannes et Dufay ont montré que l'absorption sélective de l'ozone explique d'une manière parfaite les anomalies de la transparence de l'atmosphère dans le domaine spectral considéré. En combinant les observations du mont Wilson aux mesures directes d'absorption, effectuées sur l'ozone au laboratoire, on retrouve exactement l'épaisseur calculée par MM. Fabry et Buisson, soit 3 millimètres environ, dans les conditions normales de température et de pression.

La longueur et l'aridité des explications précédentes nuisent sans doute à l'harmonie de l'ensemble et cachent quelque peu l'intérêt général de la question. Mais elles étaient nécessaires pour montrer la complexité des phénomènes, pour faire apprécier la difficulté des problèmes soulevés et la valeur des solutions obtenues. L'exposé très sommaire de toute question scientifique doit rester suffisamment précis pour entraîner la conviction ; il faut serrer d'assez près la description et l'explication des phénomènes pour les faire comprendre et accepter des esprits vraiment curieux. C'est pour avoir méconnu ce principe essentiel que de nombreux vulgarisateurs n'ont pas atteint leur but ; leurs leçons ou leurs écrits apparaissent à tous, profanes et initiés, comme un vain bavardage ou une grossière tromperie.

Il est d'ailleurs facile de résumer très succinctement les faits et les résultats qui viennent d'être exposés. L'absorption atmosphérique est due en grande partie à la diffusion du rayonnement solaire par les

gaz permanents de l'air. Cette diffusion moléculaire, prévue par Lord Rayleigh, donne l'explication correcte du bleu du ciel. Dans certaines régions spectrales, et particulièrement dans l'ultraviolet, on observe un affaiblissement supplémentaire qu'il faut attribuer à l'action filtrante de certains constituants de l'atmosphère. Parmi ces derniers, l'ozone joue un rôle capital et assez inattendu, dont dépend l'existence même des êtres vivants. Si les rayons destructeurs des cellules vivantes n'étaient pas absorbées par ce gaz, la vie disparaîtrait rapidement à la surface de la Terre. Ce bouleversement se produirait si les radiations de très courte longueur d'onde qui ozonisent la haute atmosphère subissaient une forte diminution d'intensité. Un accident de cette nature est improbable, mais non impossible. Il pourrait résulter de l'interposition, entre le Soleil et la Terre, d'un gaz absorbant très raréfié contenu, par exemple, dans une comète.

Les faits les plus saillants relatifs à l'absorption atmosphérique sont donc actuellement découverts et bien expliqués. Mais un grand nombre de problèmes secondaires restent à résoudre et ne pourront l'être que par de longues et délicates recherches. En particulier, la quantité totale d'ozone contenue dans l'atmosphère n'est pas absolument constante ; elle oscille même assez fortement autour de la valeur moyenne, correspondant à une épaisseur de 3 millimètres. L'étude de ces variations journalières présente le plus haut intérêt. Elles paraissent liées en effet aux conditions météorologiques locales, à la pression atmosphérique aux diverses altitudes et peut-être aux perturbations du magnétisme terrestre. Elles sont probablement subordonnées à l'activité du Soleil, caractérisée par le nombre de taches visibles à la surface de l'astre. Une étude systématique de ces diverses influences a été entreprise par un groupe de météorologistes anglais, sous la direction de M. Dobson. Les résultats obtenus depuis trois ans sont très encourageants, mais de nombreuses données numériques devront être accumulées avant de pouvoir dégager nettement les lois qui régissent les relations observées. Après avoir organisé six stations d'observation en Europe et une au Chili, M. Dobson se propose de faire entreprendre de nouvelles déterminations en d'autres lieux répartis sur toute la surface du globe.

Il est possible enfin que la production de l'ozone soit liée à l'ionisation de la haute atmosphère et à la formation d'une couche conductrice sur laquelle se réfléchiraient les ondes hertziennes. L'existence d'une telle couche, appelée couche d'Heaviside, a été admise pour expliquer

les phénomènes observés dans la propagation des ondes radiotélégraphiques et principalempent les grandes portées réalisées. Il serait donc intéressant de rechercher s'il existe une relation entre les particularités des transmissions radioélectriques et les variations d'épaisseur et d'altitude de la couche d'ozone.

En résumé, la présence de l'ozone dans la haute atmosphère est un fait très remarquable dont l'étude détaillée intéresse de nombreux chapitres de la Physique du globe. Mais, à cet égard, les observations isolées doivent faire place à des recherches collectives résultant d'une entente internationale. Une collaboration très étendue s'impose entre de nombreux laboratoires et observatoires convenablement outillés. Il me reste à souhaiter que les physiciens français, dont la contribution a été jusqu'à présent la plus importante, ne soient pas les derniers à s'engager dans cette voie et à participer activement au développement de ces nouvelles recherches.

Université de Lyon (Faculté des Sciences). G. DÉJARDIN.

La température des planètes (1).

La mesure des températures des planètes est évidemment une chose fort délicate et qui exige la mise en œuvre d'appareils extrêmement sensibles. Un thermomètre à mercure ne pourrait remplir cet office. On se sert pour ceci d'instruments dont le fonctionnement repose sur le principe du couple thermo-électrique. Celui-ci ne fait que jouer en quelque sorte le rôle d'un thermomètre suprasensible. Un circuit Bismuth-Argent présente ce caractère particulier de pouvoir enregistrer des élévations de température infinitésimales. Les points de soudure sont les points sensibles du couple. Il suffit donc de placer une soudure du couple thermo-électrique devant la source de chaleur, l'autre soudure étant maintenue à une température constante. Un galvanomètre très sensible intercalé dans le circuit indique l'intensité de la lumière et par conséquent de la chaleur du corps observé.

En vue d'obtenir des appareils très sensibles on a multiplié les soudures et pour éviter les pertes par rayonnement on a placé les couples thermo-électriques dans des ampoules où le vide a été fait.

(1) Résumé d'une conférence faite par M. Bruhat, professeur de physique céleste à la Sorbonne, à l'Association Astronomique du Nord à Lille. Cf. Bull. Assoc. Astron. du Nord, mai 1927.

Une des mesures les plus intéressantes faites grâce à ce procédé est celle de la température lunaire. La Lune est beaucoup plus refroidie que la Terre. Elle subit un échauffement et un refroidissement considérables selon la position du Soleil. Les mesures furent faites par Coblentz. On voit que le rayonnement de la Lune comporte deux éléments : le rayonnement solaire réfléchi et le rayonnement lunaire propre. On peut éliminer le rayonnement propre de la Lune. En effet, toutes ces radiations ont une longueur d'onde supérieure à 1,5 micron. On place sur le trajet de la lumière lunaire une cuve d'eau qui a pour propriété d'absorber ces radiations. On ne reçoit donc sur le couple thermo électrique que le rayonnement du Soleil réfléchi par la Lune. La différence donne donc l'énergie W du rayonnement lunaire. Les calculs faits par Menzel, en utilisant les lois du rayonnement, fournissent alors la température.

Les résultats obtenus montrent que celle-ci dépend de l'heure lunaire. Le Soleil éclairant le même point pendant 14 jours, il se produit, quand il passe au zénith de ce point, un échauffement de 125° centigrades. Le côté obscur de la Lune, au contraire, a une température extrêmement basse, au-dessous de —60°.

On conçoit aisément que la vie sur la Lune serait impossible pour des êtres dont les tissus contiendraient de l'eau ou des albuminoïdes.

Les mêmes mesures ont été faites pour la planète Mars. Mais ces calculs sont moins précis car l'atmosphère étant très légère, il y a de grands écarts de température d'un point à l'autre et la planète est trop loin pour qu'on puisse bien séparer l'action des différents points. Cette température est plus grande à l'équateur, car le Soleil se trouve presque dans le plan équatorial de Mars.

L'énergie envoyée par la planète Mars n'est pas constante dans toute l'échelle des longueurs d'onde et elle varie aussi avec les régions de Mars.

Les parties sombres que l'on a appelées des mers, mais qui sont plutôt des régions couvertes de végétation, absorbent davantage les radiations solaires et sont par conséquent plus chaudes.

Les températures atteintes au midi martien varient entre 10 et 20° pour les parties sombres et vont de 0° à 10° pour les parties claires.

Les variations diurnes sont très importantes aussi. La température qui est d'environ —70°, la nuit, est de —20° au lever du Soleil, pour atteindre 15° à midi martien et pour redescendre le soir à 0°.

Aussi il semble résulter de ces constatations que la température moyenne est de —30 degrés, ce qui est d'accord avec les calculs antérieurs. Les

variations de —70°, chiffre peut-être excessif, à + 15° ne semblent pas exclure la possibilité d'une vie supérieure et expliquent très bien la fusion des calottes polaires de Mars.

Pour Mercure, qui est très près du Soleil, les calculs donnent des chiffres comportant des écarts de température formidables. Comme Mercure n'a pas de rotation sur son axe, il a une face froide et une face chaude. La température de la face chaude varie suivant l'angle de phase et peut atteindre 431° quand le soleil est au Zénith. La température décroit régulièrement pour descendre à des chiffres très bas pour la partie non éclairée.

La température sur Vénus doit être sensiblement plus chaude que sur la Terre, mais les calculs manquent de précision, à cause de la trop grande importance de la lumière réfléchie par les nuages.

L'état de Jupiter nous reste caché. Les nuages qui le recouvrent faussent les calculs. On estime généralement sa température à —110°.

Pour Saturne les difficultés sont les mêmes. On compte sur une moyenne de —65° environ.

Telles sont les mesures vraiment étonnantes que la science moderne nous a permis d'effectuer.

Spectres stellaires à grande dispersion. Quelques résultats d'une étude de γ Cygni (1).

Un des principaux avantages des montures coudées appliquées aux grands télescopes est la commodité qu'elles apportent pour l'utilisation d'appareils spectroscopiques beaucoup plus puissants que ceux que l'on peut employer quand on les fixe à un instrument mobile. Le plan original du réflecteur de 100 pouces du Mont Wilson comportait un spectrographe de grandes dimensions devant être monté sur un pilier dans une enceinte fermée, au sud du télescope, la lumière passant dans cette enceinte à travers l'axe polaire creux. L'année dernière un spectrographe de 15 pieds de longueur focale et de 6 pouces d'ouverture fut complété et installé, et un nombre considérable de photographies de spectres d'étoiles brillantes fut obtenu ces mois passés. Le spectrographe est du type à auto-collimation avec un prisme en flint lourd de 53° d'angle à travers lequel la lumière est renvoyée par un miroir. Deux plaques de dix pou-

(1) ADAMS (W. S.) et JOY (A. H.). — Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A., vol. 13, n° 6, juin 1927, p. 393.

ces, d'émulsions photographiques différentes, sont utilisées régulièrement dans le porte plaque, l'une pour le bleu et l'autre pour le vert, le jaune et les portions rouges du spectre. La courbe focale de la lentille est telle qu'avec une inclinaison convenable de chaque plaque dans le chassis une bonne définition est obtenue de λ 4100 à λ 6700.

L'échelle linéaire de ces spectrogrammes, environ 2,9 angstroms au millimètre à H$_\gamma$, est la plus grande jamais utilisée pour des spectres stellaires, à l'exception de deux ou trois des étoiles les plus brillantes observées au Mont Wilson ou ailleurs quelques années avant. Le pouvoir résolvant et la définition sont tels que ces spectres conviennent spécialement pour les études d'intensité et d'identification des raies et la grande amplitude de la région spectrale couverte permet d'examiner la constitution des diverses classes de raies dans des conditions excellentes.

Les spectres des variables du type δ Cephei et des étoiles à caractéristiques semblables présentent un intérêt exceptionnel quand on les étudie sur une telle échelle, et une attention spéciale a été donnée à γ Cygni qui a un spectre à peu près identique à celui de quelques unes des Céphéïdes les plus brillantes. La magnitude apparente de cette étoile est 2,3 et une durée d'exposition de 3 heures a donné d'excellents spectres d'une longueur de 20 pouces qui sont bien mesurables de λ 4120 à λ 6700. Comme il est bien connu, son spectre, qui est ordinairement classé comme cG0 est caractérisé par la grande intensité des raies des éléments ionisés, spécialement du fer, du titane, du chrome et de quelques autres. A l'aide de ces spectres à grande échelle on pu mesurer aussi et identifier plus de 125 raies dues au cérium ionisé, au lanthane, au scandium, à l'yttrium et au zirconium. La présence du cerium et du lanthane a suggéré la recherche de raies dues à d'autres terres rares et il devint définitivement évident que le néodyme et le samarium étaient présents. Les raies saillantes des spectres d'arc de ces éléments vers le violet à 4500 ont été mesurées dans le spectre de γ Cygni. Plusieurs autres raies de plus grande longueur d'onde ont été identifiées, spécialement dans le spectre du samarium. Il est probable qu'elles appartiennent à l'élément ionisé, mais c'est encore incertain.

L'évidence de la présence d'autres terres rares, le praséodyme, l'europium et le gadolinium, quoique peu sensible, paraît assez vraisemblable cependant. Miss Payne, à l'Observatoire de Harvard College, a déjà appelé l'attention sur l'existence probable de deux raies de l'europium dans le spectre de γ Cygni. Les mesures actuelles confirment cette conclu-

sion mais indiquent que les longueurs d'ondes des raies du spectre solaire à identifier avec l'europium diffèrent de celles données par Miss Payne.

L'identification des raies de ces terres rares dans le spectre de γ Cygni rappelle l'identification de beaucoup de raies des mêmes éléments par Mitchell dans le spectre éclair à l'éclipse de Soleil de 1905. Sous beaucoup d'autres rapports la similitude du spectre stellaire et du spectre éclair est si grande que le spectre de γ Cygni peut, avec un degré considérable d'exactitude, être défini comme un renversement du spectre de la chromosphère solaire.

L'étude des déplacements des raies des divers éléments et des raies de l'atome normal et ionisé dans le cas du même élément est un champ de recherches vaste et intéressant pour lequel les spectres à grande échelle sont spécialement bien adaptés. Une série de mesures complètes sur des spectrogrammes de γ Cygni apporte une bonne confirmation des résultats obtenus antérieurement d'après une étude des spectres de quelques unes des étoiles les plus brillantes, indiquant un déplacement vers le rouge des raies renforcées par rapport aux raies d'arc. La différence moyenne, mesurée comme vitesse radiale, entre 26 raies renforcées, principalement du fer, du titane et du chrome, et 30 raies d'arc dans 6 spectrogrammes de γ Cygni est

$$\text{Raies renforcées} - \text{raies d'arc} = +0{,}65 \text{ km/sec.}$$

Un résultat nouveau et intéressant obtenu par les mesures est le déplacement systématique marqué trouvé dans le cas des raies du cérium ionisé. Une liste de 10 raies du cérium ionisé choisies comme étant, autant que possible dégagées de l'influence des autres éléments indique un déplacement correspondant en moyenne à une vitesse radiale de — 1,45 km/sec.

Quelques raies dues au lanthane ionisé donnent des résultats semblables, quoique le poids de la détermination soit beaucoup plus faible que dans le cas du cérium ionisé. Il semble assez probable que cet excès de vitesse négative de la part des raies de ces éléments de grands poids atomiques doive être considéré comme indiquant un mouvement relatif vers le haut des gaz aux bas niveaux auxquels ils se présentent dans l'atmosphère stellaire. Ces résultats peuvent, par conséquent, être interprétés comme apportant une nouvelle évidence de la présence de courants de convection qui ont été supposés d'après les observations stellaires et solaires par St John et Babcock et St John et Adams.

Demande d'observations d'étoiles variables spéciales.

La Commission des étoiles variables (n° 27) de l'Union Astronomique Internationale demande aux observateurs des renseignements concernant leurs travaux sur les listes d'étoiles variables publiées comme Appendice B au rapport de 1925 de la Commission (1).

Ces listes contiennent des variables importantes demandant une attention spéciale de la part d'observateurs entrainés. La liste 1 comprend principalement des variables des types R Coronae borealis, U Geminorum et RV Tauri; la liste 2, des variables des types irréguliers, particuliers ou inconnus.

Les observateurs sont priés d'envoyer un compte-rendu, au plus tard le 1e mai 1928, au Président de la Commission, donnant l'importance de leurs observations durant les trois dernières années, avec des références relatives aux publications d'observations, et faisant connaitre les nouvelles conclusions qu'ils ont pu obtenir sur la nature de la variabilité de chacune de ces étoiles.

La Commission se propose de dresser un plan, au prochain congrès de l'Union, d'une étude approfondie des étoiles variables importantes ou négligées, en basant ce plan sur les Compte-rendus des progrès accomplis durant les trois dernières années.

Harvard College Observatory
Cambridge, Massachussetts
27 décembre 1927.

HARLOW SHAPLEY
Président de la Commission
des étoiles variables.

NOTES ET VARIÉTÉS

La vitesse radiale et le spectre de la Céphéide T Monocerotis [1].

Courbe de lumière. — Dans un mémoire récent, R. F. Sanford a discuté brièvement la découverte et les observations photométriques consécutives de T Monocerotis, et il a donné de nouvelles raisons pour accepter le type de variation lumineuse régulière indiquée par la courbe de Wendell, qui donne le maximum à 5^m61 et le minimum à 6^m77 et un intervalle de 7 jours du minimum au maximum d'éclat. Les maxima pour l'intervalle s'étendant de 1874 à nos jours sont bien représentés par la formule:

$$\text{Max.} = \text{J. J. } 2410012{,}1956 + 27{,}003131\ E + 0{,}000025221\ E^2 \text{ T. M. G.}$$

(1) Transact. of the Intern. Astron. Union, vol. 2, pp. 104-113, 1925. Ces listes ont été publiées in-extenso, Bull. Obs. Lyon, T. VII, pp. 231, 252, 279, 1925.

qui est la formule de Bemporad avec une valeur un peu plus grande du coefficient de E^2.

Courbes de vitesse radiale. — Cinquante valeurs de la vitesse radiale ont été utilisées pour déterminer la courbe générale de vitesse radiale. Trois de celles-ci furent obtenues par Frost à l'Observatoire Yerkes en 1905 et le reste au Mont Wilson entre 1917 et 1927. La formule précédente fut trouvée la meilleure pour grouper toutes les vitesses radiales en un seul cycle et elle fut utilisée pour déterminer la courbe de vitesse.

La coïncidence du maximum d'éclat et du minimum de vitesse, et du minimum d'éclat et du maximum de vitesse est confirmée. Deux contrastes entre la courbe de lumière et la courbe de vitesse sont indiqués, l'un étant l'inflexion de la dernière environ dix jours après le minimum de vitesse sans contre partie dans les meilleures courbes de lumière et l'autre, le brusque maximum de la courbe de vitesse par comparaison avec le minimum plutôt bien arrondi de la courbe de lumière.

Le maximum de vitesse, le minimum et la vitesse du centre de masse sont +54, +4, et +32 km/sec., respectivement.

Il y a évidence d'une plus grande amplitude de variation de vitesse dans les raies dont le niveau chromosphérique dans le Soleil est en moyenne 2700 km que dans un groupe ayant une altitude moyenne d'environ 550 km. D'un autre côté, H λ, de niveau chromosphérique 2000 km, a une amplitude qui n'est pas plus grande que celle des raies de bas niveau.

La courbe de vitesse pour H γ est d'intérêt spécial car elle semble indiquer une persistance du maximum de vitesse d'approche de la couche où elle a son origine considérablement supérieure à celle des autres raies.

Spectre et changements spectraux. — La classe spectrale à la magnitude moyenne est environ cG6, et elle a la petite amplitude cG4 à cG9, entre le maximum et le minimum d'éclat.

Les raies de l'hydrogène et celles des atomes ionisés de certains éléments atteignent leur intensité maxima relative aux raies d'arc, au maximum d'éclat ; mais il y a évidence que leurs minima précédent le minimum d'éclat, dans quelques cas d'un intervalle s'étendant jusqu'à 10 jours. La relation entre l'intensité relative et la phase pour 4 paires de raies est donnée sous forme graphique. Les courbes de densité photographique pour la région spectrale de λ 4325 à λ 4352, construites avec un microphotomètre de Hartmann d'après cinq plaques de différentes phases sont données d'autre part dans ce mémoire.

Une variation de la longueur d'onde effective déterminée d'après le spectre continu à diverses phases s'accorde qualitativement avec l'évidence apportée par des courbes de lumière pour différentes longueurs d'onde ; l'une et l'autre montrent que l'étoile est nettement plus bleue au maximum d'éclat.

Régime des pluies à l'Aigoual.

Dans une étude très soignée (1) pour contribuer à la connaissance de la climatologie agricole, le savant directeur de la station de Physique de Montpellier, L. Chaptal, fait une comparaison très minutieuse et fort instructive entre les divers éléments atmosphériques sur les versants de l'Aigoual et à Montpellier, en particulier pour la pluie. On sait déjà que le régime pluviométrique d'une région montagneuse exerce une

(1) SANFORD (R. F.). — On the radial velocity and spectrum of the Cepheid variable T Monocerotis. **Astroph. Journ.**, vol. LXVI, n° 3, oct. 1927, p. 170.

action marquée sur l'agriculture de la plaine qui l'environne et la comparaison entre la climatologie de la montagne et celle de la plaine peut aussi mettre en évidence des relations très importantes pour **la prévision locale du temps, qui est la seule répondant aux besoins du cultivateur.**

Nous sommes heureux de voir ainsi affirmer, et de façon compétente, des principes que nous avons maintes fois déjà développés et, comme preuve de cette convergence des opinions, nous ne pouvons mieux faire que de reproduire la conclusion de cet important travail :

« Le meilleur moyen pour fournir des données météorologiques à l'agriculture de la contrée et de travailler à sauvegarder ses richesses agricoles **consiste à établir sa climatologie.** Jean Mascart a montré (2) que toutes les applications de la météorologie à l'agriculture reposent sur la climatologie qui est aussi la base scientifique des contrats d'assurances contre les intempéries et l'élément indispensable pour la prévision du temps local. La comparaison entre les régimes pluviométriques de l'Aigoual et de Montpellier est une contribution à l'étude de la climatologie du Languedoc méditerranéen dont nous avons déjà examiné quelques chapitres particulièrement intéressants pour l'agriculture de la région. »

Progrès de la prévision du temps.

Nous avons eu ici-même, à diverses reprises, l'occasion de parler des travaux de la jeune école météorologique française, pour indiquer que, sous les vocables de **systèmes nuageux** ou de **noyaux de variations,** elle n'avait fait en réalité que découvrir à nouveau, mais de façon peut-être un peu plus tapageuse, des propriétés connues depuis fort longtemps par les professionnels ; et, au sujet de la méthode norvégienne qui fit couler tant d'encre, un savant éminent en la matière, J. Vincent, a montré (3) que son application revient à indiquer ce que le temps **devrait être** pour satisfaire à la théorie beaucoup plus que ce qu'il est en réalité.

Malheureusement, bien des hommes ne sont sensibles qu'à la louange et n'ont pas le sens critique inséparable de la vraie Science ; et, pour diminuer la valeur de nos observations, on a crié partout, bien haut, que nous avions du parti pris en l'occurrence et que nous étions intéressés, alors que nos travaux sont assez absorbants en eux-mêmes pour nous dispenser de vaines récriminations sur des branches auxiliaires.

D'ailleurs, à quoi doivent aboutir, en fin de compte, toutes ces recherches ? à la prévision du temps, c'est bien certain. Or, voici l'aboutissement de toutes ces méthodes bruyantes :

« Beaucoup de météorologistes attendent, pour s'y rallier, (à la méthode Sche-
« reschewsky-Wehrlé), qu'elle soit confirmée par les faits et par des réussites remar-
« quables des prévisions du temps — CE QUI NE PARAIT PAS ÊTRE LE CAS : LES
« PRÉVISIONS de l'Office National Météorologique ne sont NI PLUS MAUVAISES NI
« MEILLEURES que celles de l'ancien Bureau Central Météorologique. »

Et, cette fois, ce n'est pas nous qui le disons, c'est un ancien chef du Service Météorologique aux Armées, J. Rouch (4), dont les nombreuses publications en Physique du Globe font actuellement autorité.

Morale : beaucoup de bruit pour rien.

---

(1) **Annales de l'Ec. Nat. d'Agric. de Montpellier,** t. XIX, fasc. II, 1927.

(2) Peut-on prédire le temps?, Lyon, 1924.

(3) **Bull. Obs. Lyon,** T. V, 1923, p. 197 et T. VI, 1924, p. 3.

(4) Les idées modernes sur la structure des dépressions barométriques. **La Géographie,** mai-juin 1927.